

## 航空医疗救援人员沉浸式模拟训练生理应激反应及关联因素分析

暴雨<sup>1,2</sup>, 陈妍<sup>2</sup>, 李晓乐<sup>2</sup>, 吴莹<sup>2</sup>, 黄江娜<sup>2</sup>, 郝昱文<sup>3</sup>, 周欣雨<sup>2</sup>, 马燕兰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>解放军医学院, 北京 100853; <sup>2</sup>解放军总医院第二医学中心心血管内科, 国家老年疾病临床医学研究中心, 北京 100853; <sup>3</sup>解放军总医院医学创新研究部, 北京 100853; <sup>4</sup>解放军总医院卫勤训练中心, 北京 100853

**摘要:**背景 传统航空训练缺乏生理应激模拟, 航空医疗救援人员面临的生理挑战未引起重视。目的 使用虚拟现实、增强现实等技术搭建沉浸式模拟训练系统, 分析航空医疗救援人员使用该系统进行训练的生理应激反应及其关联因素。方法 采用航空医学救援沉浸式模拟训练系统对医疗救援人员进行30 min训练, 收集训练前后的皮肤温度、心率、血压等应激相关生理指标, 比较前后变化; 以训练后唾液皮质醇(salivary cortisol, SC)为代表应激的主要指标, 分析其关联因素。结果 121例参训人员中, 男性83例(68.6%), 女性38例(31.4%), 中位年龄35(IQR: 30~36)岁; 训练前后的皮肤温度[M(IQR): 30.2(29.5~31.2)°C vs 32.1(31.5~32.6)°C]、心率[M(IQR): 71(68~78)次/min vs 80(74~85)次/min]、收缩压[M(IQR): 113(110~116) mmHg vs 123(120~126) mmHg]、舒张压[M(IQR): 78(73~81) mmHg vs 84(79~87) mmHg]、平均压[M(IQR): 90(86~93) mmHg vs 97(94~100) mmHg]、皮肤电阻[M(IQR): 470(335~600) kΩ vs 260(180~385) kΩ]及SC [9.42±2.10 nmol/L vs 14.48±3.98 nmol/L]差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。不同性别、年龄、体质质量指数、独生子女情况、婚姻状况、晕动病史、救援特情、体位的训练后SC差异有统计学意义( $P<0.05$ )。多元线性回归分析结果显示, 性别、年龄、体质质量指数、晕动病史、救援特情、训练体位与航空医疗救援人员沉浸式训练后SC水平独立关联( $F=34.748$ ,  $P<0.001$ ), 可解释总变异的69.2%。结论 该沉浸式模拟训练系统具有较好的仿真效果, 航空医疗救援人员进行沉浸式模拟训练后产生生理应激反应, 其受多种因素的影响, 应采取相应的干预与管理措施, 提升航空生理训练效果。

**关键词:**航空医学救援; 虚拟现实暴露疗法; 航空医学; 医疗救援人员; 应激生理学; 航空生理训练; 唾液皮质醇

中图分类号:R852; R395.6

文献标志码:A

文章编号:2095-5227(2025)09-0848-07

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25022801

引用本文:暴雨, 陈妍, 李晓乐, 等.航空医疗救援人员沉浸式模拟训练生理应激反应及关联因素分析 [J].解放军医学院学报, 2025, 46 (9): 848-854.

## Physiological stress responses and associated factors in immersive simulation training for aeromedical rescue personnel

BAO Yu<sup>1,2</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>, LI Xiaole<sup>2</sup>, WU Ying<sup>2</sup>, HUANG Jiangna<sup>2</sup>, HAO Yuwen<sup>3</sup>, ZHOU Xinyu<sup>2</sup>, MA Yanlan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; <sup>2</sup>Department of Cardiology, the Second Medical Center of PLA General Hospital, National Center for Clinical Research in Geriatrics, Beijing 100853, China; <sup>3</sup>Medical Innovation Research Department of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>4</sup>Medical Service Training Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China  
Corresponding author: MA Yanlan. Email: mayl301@126.com

**Abstract: Background** Traditional aviation training lacks physiological stress simulation, the physiological challenges faced by aeromedical rescue personnel have not been adequately addressed. **Objective** To explore the physiological stress responses of aeromedical rescue personnel using an immersive simulation training system based on VR, AR technologies and analyze the associated factors. **Methods** An immersive simulation training system for aeromedical rescue was used to conduct a 30-minute training session for 121 medical rescue personnel. Physiological indicators such as skin temperature, heart rate, and blood pressure were collected before and after training, the changes were compared. SC levels after training were used as the dependent variable to analyze the associated factors. **Results** Among the 121 participants, there were 83 (68.6%) males and 38 (31.4%) females with a median age of 35 (IQR: 30 - 36) years old. The differences in skin temperature [M(IQR): 30.2 (29.5 - 31.2) °C vs 32.1 (31.5 - 32.6) °C], heart rate [M(IQR): 71 (68 - 78) bpm vs 80 (74 - 85) bpm], systolic blood pressure [113 (110 - 116) mmHg vs 123 (120 - 126)] mmHg, diastolic blood pressure [78 (73 - 81) mmHg vs 84 (79 - 87) mmHg], mean arterial pressure [90 (86 - 93) mmHg vs 97 (94 - 100) mmHg], ESR [470 (335 - 600) kΩ vs 260 (180 - 385) kΩ] and SC (9.42±2.10 nmol/L vs 14.48±3.98 nmol/L) before and after the training for aeromedical rescue personnel were statistically significant (all  $P<0.05$ ). Post-training SC levels showed

收稿日期: 2025-02-28

基金项目: 省部级课题

第一作者: 暴雨, 本科, 主管护师。Email: 3191814638@qq.com

通信作者: 马燕兰, 主任护师。Email: mayl301@126.com

statistically significant differences across gender, age, BMI, only-child status, marital status, history of motion sickness, rescue scenarios and training posture ( $P < 0.05$ ). Multiple linear regression analysis revealed that gender, age, BMI, history of motion sickness, rescue scenarios and training posture were the associated factors for SC levels after immersive training ( $F = 34.748$ ,  $P < 0.001$ ), which explained 69.2% of the total variation. **Conclusion** The immersive simulation training system demonstrates high fidelity. Aeromedical rescue personnel exhibit physiological stress responses after immersive training, which are influenced by multiple factors. Corresponding intervention and management measures should be implemented to enhance the effectiveness of aeromedical physiological training.

**Keywords:** aeromedical rescue; virtual reality exposure therapy; aerospace medicine; medical rescue personnel; stress physiology; aviation physiological training; salivary cortisol

**Cited as:** Bao Y, Chen Y, Li XL, et al. Physiological stress responses and associated factors in immersive simulation training for aeromedical rescue personnel[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(9): 848-854.

航空医学救援作为国家应急救援体系的重要组成部分, 凭借快速响应、高度机动和广泛覆盖的优势, 在战创伤及危重症患者转运中发挥着不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。这一高效救援模式的实现, 高度依赖于救援人员的专业能力与适应水平, 从事航空救援的医务人员不仅需要具备专业的医疗技能, 还必须通过系统培训获得资质认证, 以应对航空转运环境中特有的生理挑战<sup>[3]</sup>。在航空救援过程中, 医务人员面临着一个多重复合应激环境: 低压缺氧、温湿度变化、引擎噪声、振动加速度等因素共同构成显著的生理压力源<sup>[4]</sup>。这些应激因素通过激活神经内分泌调节系统引发一系列生理反应, 其中下丘脑-垂体-肾上腺(hypothalamic-pituitary-adrenal, HPA)轴作为应激反应的核心调控通路, 在维持机体稳态和适应环境挑战中起着至关重要的作用。皮质醇作为HPA轴的终端效应激素, 其分泌水平直接反映机体的应激状态强度与持续时间<sup>[5]</sup>, 而唾液皮质醇(salivary cortisol, SC)检测因其独特的优势已成为应激生理学的重要方法<sup>[6]</sup>: 首先, SC与血清游离皮质醇浓度高度相关, 能够准确反映HPA轴活性; 其次, 唾液采集具有无创、简便、可重复的特点, 避免静脉穿刺本身引发的应激反应, 特别适合航空环境等实时监测场景。此外, SC检测可实现多时间点动态监测, 能够捕捉应激反应的时程变化特征。这些优势使SC成为评估航空救援人员生理应激反应的理想指标。

当前国内航空医学救援训练面临实质性挑战。传统地面模拟训练依赖理论学习与推演, 设施落后、科目单一, 尤其缺乏对生理应激反应的针对性训练与评估方法<sup>[7-8]</sup>。实飞训练虽能提供真实环境, 但成本高昂、审批复杂, 且难以实现标准化应激评估。随着虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)技术的发展, 利用VR、AR在地面构建航空飞行环境开展仿真训练已

经实现, 这为解决传统训练方式的局限性提供了突破路径<sup>[9]</sup>。

本研究整合先进技术方法, 运用VR、AR技术与六自由度平台构建航空医学救援沉浸式模拟训练系统, 对医疗救援人员进行标准化沉浸式训练。通过系统比较训练前后皮肤温度、心率、血压等多维度生理指标变化, 并特别选取唾液皮质醇这一敏感、可靠的HPA轴激活标志物作为核心因变量, 综合分析其关联因素, 为后续开展针对性干预与系统化管理、提升航空生理训练效果提供科学依据。

## 1 对象和方法

### 1.1 研究对象

采用便利抽样法, 于2024年2~11月选择北京市、江西省等有救援任务需求、预备参加航空医学救援的医务人员在航空医学救援实验室开展训练。纳入标准: (1)取得执业资格的医务工作者; (2)从事临床工作3年以上; (3)未参加过航空医学救援任务; (4)自愿参加本研究。排除标准: (1)既往乘坐过直升机者; (2)孕产妇; (3)体质指数(body mass index, BMI)  $< 18.5 \text{ kg/m}^2$  或  $> 28 \text{ kg/m}^2$ ; (4)既往发现高血压、糖耐量异常者。剔除标准: 中途不能坚持退出者。本研究已经解放军总医院医学伦理委员会批准(S2023-550-4)。

### 1.2 样本量计算

依据多元线性回归样本量的要求, 样本量为自变量的10倍以上<sup>[10]</sup>。本研究计划纳入性别、年龄等12个自变量, 至少需要纳入120例。

### 1.3 模拟训练设备

VR、AR技术结合航空医学救援沉浸式模拟训练系统, 由六自由度平台、AC313A型直升飞机舱、控制系统等组成。根据直升机飞行谱数据及飞行特征拟合的参数模拟飞行条件, 通过六自由度平台复现飞行过程中产生的位移、姿态、速度、

角速度等；利用VR技术仿真机舱内外救援环境，结合平台运动参数对飞行救援过程进行复原和重现，模拟舱内总体布置、照明效果、噪声环境等，布置了声、光、电，达到救援环境的沉浸感和真实性；利用AR技术模拟伤情演变、病情观察等，搭建虚拟仿真伤员。布置了雪崩、火灾、地震3种救援场景进行仿真飞行，伤情分别为心脏骤停、呼吸窘迫及失血性休克后伤员病情观察。模拟飞行声音设置范围：雪崩场景65~75 dB，火灾场景70~80 dB，地震场景75~85 dB，均可影响机上正常沟通交流。3种救援场景特情均从接到上级通知下达起飞命令至救援场所，再返回后方医院附近停机坪为止。该系统运动参数见表1。

表1 航空医学救援沉浸式模拟训练系统运动参数

Tab. 1 Motion parameters of the immersive simulation training system for aeromedical rescue

平台运动	最大位移量	最大速度	最大加速度
侧向运动	±892 mm	±710 mm/s	0.8 G
纵向位移	±760 mm	±710 mm/s	0.8 G
垂直运动	±1 226 mm	±710 mm/s	0.8 G
俯仰运动	±25°	±20°/s	±200°/s <sup>2</sup>
滚转运动	±25°	±20°/s	±200°/s <sup>2</sup>
偏航运动	±33°	±20°/s	±200°/s <sup>2</sup>

## 1.4 研究方法

**1.4.1 训练前准备** 训练前进行场地准备、平台调试及人员分工。

**1.4.2 实施步骤** 使用沉浸式模拟训练系统，对纳入的研究对象进行仿真飞行训练30 min，比较训练前后的生理指标变化，以训练后SC为因变量，分析其关联因素。具体步骤如下：(1)训练前准备：研究对象训练前1 d避免油腻食物，作息规律，体验日晨起正常进餐，不做剧烈活动。(2)到达实验室：研究对象9:00到达实验室，进入休息区。(3)宣教：熟悉上下机舱的方法，VR、AR的使用及注意事项；接受安全教育，仿真飞行期间禁止靠近舱门，统一发生不适需要中止的手势。(4)一般资料收集：研究者使用一般资料收集表收集性别、年龄、身高、体质量、晕动病史等基本资料。(5)生理指标采集：9:50禁食水，采集心率、皮肤温度、血压及皮肤电阻(electric skin resistance, ESR)等生理指标，5 min内测量3次取中间值。留取唾液标本。(6)仿真飞行训练：研究对象进入沉浸式训练系统舱体后自行选择站立位或坐位，期间坐位人员佩戴安全带，站立位人员

手扶把手，中途不可更改体位。所有人员准备完毕后联系“塔台”，做好起飞准备。10:00开始，在随机选择的救援场景中进行仿真飞行训练，期间无需进行任何操作。如中途发生不适，通过手势告知操作员停止仿真飞行。(7)生理指标采集：30 min后待舱体停止仿真飞行，采集心率、皮肤温度、血压及ESR等生理指标，5 min内测量3次取中间值。留取唾液标本。(8)下机：听从语音通知，舱门打开后下机。

**1.4.3 标本处理** 采用酶联免疫吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)检测SC。ELISA法检测步骤：标本进行解冻、离心，取上清液；往预先包被SC抗体的包被微孔中，依次加入标本、标准品、检测抗体，经过温育并彻底洗涤，用底物显色，用酶标仪在450 nm波长下测定光吸收度，计算SC浓度。

## 1.5 质量控制

统一收集生理指标的时间；所有唾液标本采集量>0.8 mL，采集后2~8°C保存，后-20°C冻存，避免反复冻融，统一送实验室进行检测，以降低对结果的影响。

## 1.6 统计学方法

采用SPSS 26.0进行统计学分析。服从正态分布的数据采用 $t$ 检验，不符合正态分布的数据采用非参数秩和检验；计数资料以例数(百分比)表示，组间比较采用 $\chi^2$ 检验；采用多元线性回归分析训练后SC的关联因素。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 研究对象一般资料

最终纳入121例研究对象，中位年龄35(IQR: 30~36)岁，其中男83例(68.6%)，女38例(31.4%)，BMI(23.68±1.88) kg/m<sup>2</sup>。既往有晕车(机、船等)晕动病史29例(24.0%)，雪崩、火灾、地震救援场景训练人数分别为40例(33.1%)、40例(33.1%)、41例(33.8%)，坐位训练者77例(63.6%)。

### 2.2 沉浸式模拟训练系统训练前后研究对象生理指标比较

研究对象使用沉浸式模拟训练系统，对训练前与训练后皮肤温度、心率、血压等生理指标进行比较，训练后的皮肤温度、心率、血压及SC较训练前上升，训练后的ESR较训练前下降，差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。见表2。

表2 研究对象训练前后生理指标比较(n=121)

Tab. 2 Comparison of physiological indicators in the research subjects before and after training (n=121)

指标	训练前	训练后	Z/t值	P值
皮肤温度/[°C, M(IQR)]	30.2 (29.5 ~ 31.2)	32.1 (31.5 ~ 32.6)	-9.459	<0.001
心率/[次/min, M(IQR)]	71(68 ~ 78)	80(74 ~ 85)	-9.293	<0.001
收缩压/[mmHg, M(IQR)]	113(110 ~ 116)	123(120 ~ 126)	-9.508	<0.001
舒张压/[mmHg, M(IQR)]	78(73 ~ 81)	84(79 ~ 87)	-9.293	<0.001
平均压/[mmHg, M(IQR)]	90(86 ~ 93)	97(94 ~ 100)	-9.537	<0.001
ESR/[kΩ, M(IQR)]	470 (335 ~ 600)	260 (180 ~ 385)	-9.102	<0.001
SC/(nmol/L, $\bar{x}\pm s$ )	9.42±2.10	14.48±3.98	-15.149	<0.001

### 2.3 训练后SC在各人口、社会、训练指标不同类别间的分布差异

研究对象不同文化程度、职称、工作年限、月收入的训练后SC差异均无统计学意义( $P>0.05$ );训练后SC在性别、年龄、BMI、独生子女、婚姻状况、晕动病史、救援场景、体位不同水平间的分布差异有统计学意义( $P<0.05$ )。见表3。

### 2.4 训练后SC水平的关联因素分析

以训练后SC水平为因变量,以单因素分析中有统计学意义的项目为自变量,进行多元线性回归分析。自变量赋值方式见表4。回归模型结果显示:D-W值为1.612,满足独立性条件;VIF范围为1.056~1.768,变量间相互独立,不存在严重的共线性问题;性别、年龄、BMI、晕动病史、救援场景、训练体位是其关联因素( $F=34.748$ ,  $P<0.001$ )。见表5。

## 3 讨论

### 3.1 沉浸式模拟训练系统具有较好效果,航空医疗救援人员训练后生理指标改变

航空医学救援具有高风险性、高技术性、高负荷性等特点,气流、颠簸、失压、迫降等突发情况可造成机上伤员病情变化,增加医疗救援人员对患者病情的判断难度<sup>[4]</sup>;噪声、震动及颠簸等影响机上人员沟通交流<sup>[11]</sup>;加速度可影响前庭功能,造成救援人员眩晕、呕吐等前庭功能障碍<sup>[12]</sup>,影响认知和感知能力,因此对航空医疗救援人员的生理提出了较高的要求。传统地面模拟训练效果差,达不到普训效果。实飞训练成本高,且需要上级审批、报批航线等,不易组织实施。随着科技的发展,应用VR、AR技术构建仿真训练环境对人员开展生理专项训练具有现实意义。本研

表3 研究对象一般资料与训练后SC水平(n=121)

Tab. 3 General information of the research subjects and SC levels after training (n=121)

指标	例数/(例,%)	SC/(nmol/L, $\bar{x}\pm s$ )	F/t值	P值
性别			-6.087	<0.001
男	83(68.6)	13.17±3.43		
女	38(31.4)	17.34±3.64		
年龄			-7.061	<0.001
<35岁	75(62.0)	12.79±3.15		
>35岁	46(38.0)	17.23±3.67		
BMI			-7.386	<0.001
18.5 ~ 23.9 kg/m <sup>2</sup>	67(55.4)	12.48±2.80		
24.0 ~ 27.9 kg/m <sup>2</sup>	54(44.6)	16.96±3.86		
文化程度			0.195	0.823
大专及以下	5(4.1)	15.56±3.14		
本科	88(72.7)	14.41±4.14		
研究生	28(23.2)	14.50±3.71		
职称			0.499	0.608
初级	46(38.0)	14.51±3.45		
中级	61(50.4)	14.24±4.23		
高级	14(11.6)	15.42±4.63		
工作年限			1.384	0.255
<5年	42(34.7)	15.30±4.12		
5 ~ 10年	44(36.4)	14.01±3.91		
>10年	35(28.9)	14.08±3.86		
月收入			0.826	0.440
<5 000元	15(12.4)	15.71±5.23		
5 000 ~ 10 000元	57(47.1)	14.26±3.92		
>10 000元	49(40.5)	14.36±3.64		
独生子女			3.383	0.001
是	49(40.5)	15.90±3.86		
否	72(59.5)	13.51±3.80		
婚姻状况			2.105	0.037
未婚(含离异)	46(38.0)	15.44±4.75		
已婚	75(62.0)	13.89±3.33		
晕动病史			5.539	<0.001
是	29(24.0)	17.68±4.30		
否	92(76.0)	13.47±3.31		
救援场景			9.494	<0.001
雪崩	40(33.1)	12.52±3.30		
火灾	40(33.1)	14.60±2.89		
地震	41(33.8)	16.27±4.66		
训练体位			-8.710	<0.001
坐位	77(63.6)	12.61±2.85		
站立位	44(36.4)	17.75±3.57		

究采用VR、AR技术和六自由度平台搭建的航空医学救援沉浸式模拟训练系统,构建多种航空医学救援场景,对医护人员开展沉浸式生理训练后,生理指标均产生变化,提示本研究采用的沉浸式

表 4 自变量赋值方式

**Tab. 4 Assignment methods for independent variables**

变量	赋值方式
性别	男=1;女=2
年龄	≤35岁=1; >35岁=2
BMI	18.5~23.9 kg/m <sup>2</sup> =1; 24.0~27.9 kg/m <sup>2</sup> =2
独生子女	是=1;否=2
婚姻状况	已婚=1;未婚(含离异)=2
晕动病史	是=1;否=2
救援场景	雪崩场景=1;火灾场景=2;地震场景=3
训练体位	坐位=1;站立位=2

表 5 研究对象训练后唾液皮质醇的关联因素

**Tab. 5 Associated factors of SC in the research subjects post-training**

项目	B值	Sx	β值	t值	P值	95% CI	VIF
常数	6.281	1.724	-	3.642	<0.001	2.901~9.660	-
性别	1.136	0.533	0.133	2.131	0.035	0.091~2.180	1.516
年龄	1.564	0.522	0.191	2.994	0.003	0.540~2.588	1.593
BMI	1.658	0.488	0.208	3.396	0.001	-1.426~0.428	1.459
独生子女	-0.499	0.473	-0.062	-1.055	0.294	-0.838~0.920	1.335
婚姻状况	0.041	0.449	0.005	0.091	0.928	-3.084~-0.998	1.174
晕动病史	-2.041	0.532	-0.220	-3.835	<0.001	1.017~2.006	1.278
救援场景	1.512	0.252	0.312	5.989	<0.001	1.432~3.609	1.056
训练体位	2.52	0.555	0.306	4.538	<0.001	2.901~9.660	1.768
R <sup>2</sup> 值	0.713						
调整R <sup>2</sup> 值	0.692						
F值	34.748(P<0.001)						
D-W值	1.612						

模拟系统对航空生理训练有一定效果。生理反应是机体对外界刺激产生的变化，可引起神经内分泌变化，造成应激反应，航空救援引起医疗救援人员生理指标变化的可能原因如下。(1)与航空医学救援任务负荷相关：航空医学救援不同于传统陆路救援，伤病员一般具有急、危、重等特点，进行伤病员转运救援难度较大，引起医护人员生理应激反应<sup>[13]</sup>；救援人员缺乏后援支持<sup>[14]</sup>，影响医疗决策部署从而可能会加重应激程度，体现在生理指标的变化上。(2)飞行安全引起：救援须经高空飞行，飞行安全影响人员应激反应，体现在皮质醇分泌上。(3)航空医学救援中噪声、震动、颠簸等影响：有研究发现噪声、震动等均会加重应激，造成心率加快、皮肤电改变等生理反应<sup>[11]</sup>；噪声作为一种应激(压力)源，使HPA轴为主的神经内分泌系统被激活，促进分泌和释放应激激素<sup>[13]</sup>。(4)医疗救援人员的专业知识、职业技能、熟悉程度、心理素质会对航空医疗转运产生正向影响：

研究表明，有救援经验和未参加过救援的人员在任务时均出现应激反应，但经验丰富的人员压力反应低于没有经验的救援者<sup>[16]</sup>；本研究选取对象均为未参加过航空医学救援的人员，其熟悉程度、适应水平都处于较低水平，造成生理应激反应较为强烈。

### 3.2 航空医疗救援人员生理应激反应的关联因素分析

皮质醇是由肾上腺在应激或兴奋状态下合成，在维持体内糖原分解、免疫功能、骨代谢和血压等生理过程中发挥着重要的作用，也是评估生理心理压力相关的重要生物学标志物<sup>[17]</sup>。皮质醇分泌受HPA轴调控，受生理节律、情绪状态和外部环境等多种因素影响，呈现昼夜节律，其产生后可迅速由血液转移到唾液<sup>[18]</sup>。因此人体唾液中含有少量的皮质醇，具有采集方便、无创的特点<sup>[19]</sup>。本研究通过训练后的SC水平探讨其影响因素，发现性别、年龄、BMI、晕动病史等是其关联因素。

**3.2.1 人口学因素** 本研究结果显示，性别、年龄及BMI是影响航空医疗救援人员沉浸式训练后SC水平的重要人口学因素(P<0.05)。35岁以上救援人员SC水平较35岁以下人员高，女性较男性SC高，BMI与SC呈正相关。有研究表明，年龄对应激水平有影响，女性应激水平较男性更高<sup>[20]</sup>，BMI与人体神经内分泌调节密切相关<sup>[21]</sup>，BMI越高，SC水平越高，与本研究结果一致。分析可能原因：(1)个体随着年龄增长以及阅历的不断丰富，在漫长时间里所承受的压力会产生累积效应。这种累积致使机体对于压力的抵抗能力逐渐下降，同时，年龄递增过程中，来自家庭、工作等层面的压力也会持续攀升，到中年时期达到较高水平<sup>[22]</sup>。当这类人群受到航空救援训练这一应激性事件刺激时，应激程度上升，引起HPA轴分泌变化，SC水平升高。(2)在开展航空救援沉浸式训练期间，女性的SC水平高于男性。这是由于男女在面对应激状况时，生理心理调适能力与应激反应能力存在差异<sup>[23]</sup>。此外，女性受生理因素、家庭环境以及职业发展前景等因素的影响更为显著。女性较男性承受更多的压力，所以在面对应激事件时，她们更容易受到冲击。(3)我国成人BMI正常范围为18.5~23.9 kg/m<sup>2</sup>，BMI>24 kg/m<sup>2</sup>即为超重，BMI与HPA轴及交感神经系统异常激活、体内应激、炎症等密切相关，体内脂代谢异常，引起SC水平升高，与一过性生理反应过大无必然联

系<sup>[24]</sup>。HPA轴功能发生紊乱，BMI升高，长期作用下可引起生理心理相关疾病。本研究中BMI越高，其SC水平就越高，究其原因，一是与肥胖机体内分泌激素代偿分泌相关；二是与长期应激等负性事件引起应激反应过大有关。建议在后续沉浸式训练中，对不同性别、年龄、BMI人员开展针对性训练，以降低其生理应激水平，提高适应能力。

**3.2.2 晕动病史** 研究结果显示，晕动病史是影响航空医疗救援人员沉浸式训练后SC水平的重要影响因素。有晕机(车、船)等晕动病史的人员较无晕动病史的人员应激激素水平更高，与相关研究结果一致<sup>[25]</sup>。分析原因：(1)晕动病与机体应激存在关联，会使体内内分泌激素产生变化。近年来，已将皮质醇、 $\alpha$ -淀粉酶等生物标志物用于晕动病程度评估中<sup>[26]</sup>。皮质醇在慢性应激反应中能够起到抑制作用，可抑制或延缓晕动病的形成，但在急性应激反应中情况则相反。本研究中为急性应激反应，导致SC升高。因有晕动病史的救援人员训练时，机体暴露于外界环境，视觉和前庭功能等受到刺激，进而产生头晕、恶心、呕吐、出冷汗等一系列生理不适症状。这些不适会引发焦虑、紧张、恐惧甚至逃避等心理反应，心理生理相互影响，造成应激反应，导致SC水平增加。(2)生理、心理状态与晕动病相关<sup>[27]</sup>。疲劳、空腹或过饱等生理因素以及情绪紧张、焦虑等心理因素，都可能诱发或加重有晕动病史人员的症状<sup>[28]</sup>。航空医疗救援人员在参加训练时，由于情绪紧张、恐惧等因素，处于应激状态，诱发晕机症状。晕机症状又会进一步致使应激水平上升，造成SC水平升高。(3)与VR、AR技术的应用有关<sup>[29]</sup>。训练过程中，由VR、AR建模生成的立体视听感觉，放大了人体本体感觉，加剧了晕动病的发生。在后续的人员选拔与训练中，应注意以下两个方面：一是选择无晕动病史的救援人员，二是针对晕动病症状较轻的人员使用该训练系统开展抗眩晕训练，使其产生习服，从而适应航空医学救援的需要。

**3.2.3 航空医学救援沉浸式训练中应激源强度** 在参加航空医学救援时，任务不同，责任与风险不同。本研究筛选3种具有代表性的救援特情，分别采用包含保障飞行安全的坐位和病情观察处站的站立位进行沉浸式训练。结果表明，不同场景救援特情下人员SC水平不同。站立位比坐位救援

人员SC水平更高，3种救援特情及训练体位对人体产生的生理应激反应程度不同，提示应激源强度是影响航空医疗救援人员沉浸式训练SC水平的重要因素。究其可能原因：(1)救援特情产生的应激刺激有特异性。3种救援特情均可使机体感受到震动、颠簸、加速度等虚实仿真感受，但其伤情观察、噪声强度等均不相同。噪声作为航空医学救援中的重要应激(压力)源，对乘机的个体行为和生理等方面产生影响，神经内分泌系统被激活，促进分泌释放应激激素，产生生理应激反应。在训练过程中，医疗救援人员面临的伤情观察不同，视觉感受不同，伤情处置方式也不同，产生的生理应激反应程度不同，体现在SC水平上<sup>[30]</sup>。(2)不同体位对皮质醇的效果不同。不同体位皮质醇波动与情绪波动趋势一致，但影响不同。人体站立位时，与坐位系安全带感受的震动幅度不同，横向、纵向运动感受不同，站立位比坐位对救援人员的应激更大，造成SC升高<sup>[31]</sup>。建议在对预备参加航空医学救援的医务人员开展沉浸式适航训练时，针对特征性应激源如噪声、震动、颠簸等开展习服训练，但训练的方式方法仍有待进一步探讨。

综上所述，采用航空医学救援沉浸式模拟训练系统对有救援任务需求、预备参加航空救援任务的医务人员进行训练，训练前后生理指标发生变化，该系统模拟航空救援训练具有一定的效果。性别、年龄、BMI、晕动病史、救援特情、训练体位均是作用于航空医疗救援人员沉浸式训练SC水平的关联因素。提示此类航空医疗救援人员在执行训练任务时面临着较为强烈的生理应激反应，引起心率、血压等生理指标的变化，后续应使用该系统进行相应的干预及训练，以提高航空生理训练效果。本研究存在一定局限性：(1)因影响皮质醇分泌的因素较多，本研究仅从影响航空医学救援的因素进行探讨和分析；(2)研究对象来自军地多家单位，但样本量有限，仅采用部分生理应激指标进行探讨，后续研究可扩大调查范围，进一步探索多因素间的作用，进而不断提升航空医学救援水平。

**作者贡献** 暴雨：论文撰写与数据分析；李晓乐：审读和修订；陈妍、吴莹、黄江娜、郝昱文：数据收集；周欣雨：数据整理；马燕兰：研究指导。

**利益冲突** 所有作者均声明无利益冲突。

**数据共享声明** 本论文相关数据暂不共享。**参考文献**

- 1 吴培熠, 田卓冉, 刘虎. 美德日航空应急救援体系比较及启示 [J]. 中国应急管理科学, 2024 (12): 81-95.
- 2 闵东, 瞿洪平, 毛恩强, 等. 航空医疗救援的技术进展 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2022, 17 (10): 1394-1397.
- 3 刘大响, 黄敏. 中国航空医疗救护的发展与建议 [J]. 北京航空航天大学学报 (社会科学版), 2024, 37 (3): 53-67.
- 4 暴雨, 邱孝丰, 谢宇霖, 等. 航空转运条件下医疗相关影响因素研究现状及进展 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2022, 17 (7): 968-972.
- 5 Russell G, Lightman S. The human stress response [J]. Nat Rev Endocrinol, 2019, 15(9): 525-534.
- 6 Adam E K, Quinn M E, Tavernier R, et al. Diurnal cortisol slopes and mental and physical health outcomes: A systematic review and meta-analysis [J]. Psychoneuroendocrinology, 2017, 83: 25-41.
- 7 暴雨, 高萌, 谢宇霖, 等. 国内外航空医疗救援队伍发展现状 [J]. 解放军医学院学报, 2021, 42 (7): 776-779.
- 8 刘岩, 李晓雪, 郝昱文, 等. 直升机应急医疗救援培训需求的横断面调查研究及启示 [J]. 解放军医学院学报, 2024, 45 (3): 310-314.
- 9 芦艳春, 余伟, 陈新, 等. 航空医疗救援分队训练现状调查及影响因素分析 [J]. 空军军医大学学报, 2024, 15 (8): 945-948.
- 10 夏万元. 线性回归和 logistic 回归模型样本量计算的图示化探索研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2019.
- 11 杨沂川, 刘楠楠. 基于 NPD 数据库飞行离场优化程序噪音评估 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2024, 35 (3): 16-20.
- 12 汪燕. 民航飞行学员航空体育专项器械训练效果实证研究: 基于旋梯训练对基本生理参数的影响 [J]. 体育风尚, 2021 (4): 82-83.
- 13 方瑜, 郑丹莉, 白祥军, 等. 湖北省医务人员航空医学救援培训及技能现况调查 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2023, 18 (4): 544-547.
- 14 刘振华, 周开园, 姜俊, 等. 军队航空医疗救援网络化体系建设探讨 [J]. 人民军医, 2021, 64 (12): 1183-1186.
- 15 范紫慧, 邹建文, 陈其才, 等. 噪声暴露所致的应激反应及其测量方法 [J]. 生理学报, 2024, 76 (3): 407-417.
- 16 Vicente-Rodríguez M, Iglesias Gallego D, Fuentes-García JP, et al. Portable biosensors for psychophysiological stress monitoring of a helicopter crew [J]. Sensors (Basel), 2020, 20 (23): 6849.
- 17 Hakeem MK, Sallabi S, Ahmed R, et al. A dual biomarker approach to stress: hair and salivary Cortisol measurement in students via LC-MS/MS [J]. Anal Sci Adv, 2025, 6 (1): e70003.
- 18 Jazzar A, AlDehlawi H, Farag A, et al. Clinical parameters in patients with halitosis: a cross-sectional study [J]. Front Dent Med, 2024, 5: 1427280.
- 19 Egorov AI, Xue W, Kobylanski J, et al. Pilot application of an inflammation and physiological dysregulation index based on noninvasive salivary biomarkers [J]. BMC Res Notes, 2025, 18 (1): 53.
- 20 MacGregor AJ, Dougherty AL, Crouch DJ, et al. Sex differences in screening positive for post-traumatic stress disorder after combat injury [J]. Mil Med, 2024, 189 (11/12): 2594-2599.
- 21 Williams DP, Joseph N, Sones E, et al. Effects of body mass index on parasympathetic nervous system reactivity and recovery following orthostatic stress [J]. J Nutr Health Aging, 2017, 21 (10): 1250-1253.
- 22 Gajewski PD, Bröde P, Claus M, et al. The association between hair Cortisol and burnout is moderated by age, psychosocial, and immunological markers [J]. Brain Behav Immun Health, 2024, 43: 100909.
- 23 Mengelkoch S, Slavich GM. Sex differences in stress susceptibility as a key mechanism underlying depression risk [J]. Curr Psychiatry Rep, 2024, 26 (4): 157-165.
- 24 Singh J, Khullar S, Kaur H. Association between BMI and cardiovascular response to acute stress in young Indian adults [J]. Int Jour Physiol, 2018, 6 (2): 84.
- 25 Young BE, Patinkin ZW, Pyle L, et al. Markers of oxidative stress in human milk do not differ by maternal BMI but are related to infant growth trajectories [J]. Matern Child Health J, 2017, 21 (6): 1367-1376.
- 26 Wang YB, Liu C, Zhao WJ, et al. Biosensors and biomarkers for the detection of motion sickness [J]. Adv Healthc Mater, 2025, 14 (9): e2403606.
- 27 谢奇伟, 屠佳丽, 王耀文, 等. 晕动病临床模型及基于血液指标诊断模型的构建 [J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2024, 31 (7): 435-439.
- 28 金小鄂, 姚乃心, 陈卓, 等. 大学生初次航海实习晕动病发生情况及影响因素分析 [J]. 海军医学杂志, 2024, 45 (6): 606-611.
- 29 坂本顺. VR 晕动病减轻系统、头戴式显示器、VR 晕动病减轻方法: CN119544947A [P]. 2025-02-28.
- 30 沈振乾, 孙斐, 王瑶, 等. 虚拟现实下视觉诱发晕动病生理评估及治疗方式研究进展 [J]. 中国医学科学院学报, 2023, 45 (6): 980-986.
- 31 高瑞. 考虑乘员晕动病的弯道预测巡航控制策略研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.

(责任编辑: 孙菲)